

自然风非稳态特性及其对室内环境的影响

周军莉^{1,2}, 胡艳¹, 张国强¹

1. 湖南大学土木工程学院, 长沙 410082

2. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 武汉 430070

摘要 目前大部分自然通风的研究只考虑了简单的平均特性, 假定自然风为恒定风会造成与实际效果较大误差。鉴于此, 为了更加客观精确地探讨自然通风建筑通风效果, 详细综述了自然风的波动特性, 并讨论了自然风波动特性对自然通风量的影响, 将通风量的预测方法归纳为基于稳态条件下的修正方法和基于波动条件下的非稳态模型方法, 分析了自然风的湍流强度和波动频率两个参数对人体热舒适的影响。指出需尽快建立适用于中国工程设计用的基于非稳态边界条件下的自然通风模型。

关键词 自然风; 非稳态; 室内环境

中图分类号 TU83

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.13.010

Unsteady Characteristics of Natural Wind and Its Influence on Indoor Environment

ZHOU Junli^{1,2}, HU Yan¹, ZHANG Guoqiang¹

1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

Abstract At present, most studies in this direction consider only the characteristics of the mean flow rate in the natural ventilation, which would lead to errors, because the wind is thus considered as a steady flow. In order to better evaluate the ventilation effects of naturally ventilated buildings, the fluctuating characteristics of the natural wind should be considered, and the impacts of the fluctuating characteristics on the natural ventilation rates are discussed in this paper. The prediction methods for the ventilation rates are divided into two types: the correction method based on the steady-state flow assumption and the fluctuation method based on the unsteady-state flow assumption. Meanwhile, the effects of the turbulence intensity and the pulsation frequency of the natural wind on the human thermal comfort are analyzed. It is pointed out that a natural ventilation model should be developed based on the fluctuating wind for the engineering design in China.

Keywords natural wind; fluctuating wind; indoor environment

0 引言

在有关自然通风的研究中, 无论是理论研究、数值模拟, 还是风洞试验, 外场边界条件大都建立在稳态边界层的基础上, 即气象台给出的主导风向和平均风速的统计观测值。在这种稳态边界条件下, 研究得出了不少有关自然通风的有意义的结论。然而在整个大气边界层内, 由于近地层的气流与地面相互作用非常强烈, 大气常处于湍流状态, 速度的大小和方向都呈随机变化, 自然风具有紊态和非稳态两种特征。根据湍流原理, 自然风可由平均风和波动风两部分构成。因此, 以往平均风条件下的研究结果是否符合实际条件, 值得

商榷。

2007年, Chiu等^[1]对稳态和非稳态边界条件下带烟囱的自然通风建筑模型进行了风洞实验, 分析得出流量系数存在差异; 同年, 柯其枝^[2]、王亮^[3]等分别就连续恒定风和非连续自然风对某厂房的通风效果进行了数值模拟和实验研究, 研究表明该两种边界条件下的通风效果存在明显差异。2009年, 李志强等^[4]研究了正弦波动来流下建筑表面的风压分布, 与定常平均来流相比, 风压系数变化平均达15%, 局部最大值达45%。以上研究表明, 在非稳态和稳态边界层条件下, 自然通风效果存在明显差异。稳态边界条件下, 自然风随机性变

收稿日期: 2012-02-23; 修回日期: 2012-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108165); 中央高校基本科研项目

作者简介: 周军莉, 副教授, 研究方向为自然通风与建筑节能, 电子信箱: zjlhunu@126.com

化的特征难以被完全描述,因此最终计算结果不能客观真实地反映自然通风的效果。针对上述问题,本文对自然风的非稳态特性进行了总结,并主要分析了波动风特性对室内环境的影响。

1 自然风特性

Straw 等^[9]研究表明风压驱动的自然通风由两部分组成:由开口处平均压力引起的平均风以及由开口处波动压力引起的波动风。自然风特性包括平均风特性和波动风特性,而特性参数则为自然通风的理论计算、数值模拟及实验的边界条件的构建提供了数据依据。

1.1 平均风特性

自然风的平均风特性包括平均风速、平均风向、风速廓线和风频曲线等。平均风速是指在某时距内,空间某点上各瞬时风速的平均值,其值的大小与时距的选取有很大的关系,中国规定的时距为 10min。风速的大小除与时距与有关外,还取决于风速仪的高度,中国规定的高度为 10m。虽然平均风速随时间和空间变化,但其分布仍有一定的统计规律。通过计算可以绘制出不同风速的概率密度曲线图或累积分布曲线图,大量研究表明自然风呈偏左态分布^[6]。一般情况下,用威布尔分布可以较好地拟合实际平均风速的概率密度曲线。风向的变化也是随机的,平均风向一般由各地区气象台站利用风向仪记录资料并绘制成风向玫瑰图而成。平均风速随所处地理位置的高低而变化,这种变化规律称风速廓线,风速廓线可采用对数律分布或指数律分布表示,在许多风工程研究中,来流风速采用的均是指指数律分布函数^[7-10]。在自然通风研究领域的最初的阶段,人们多集中在对平均风特性的研究上^[11-13]。

1.2 波动风特性

波动风是一种随时间和空间的变化呈强烈的非线性随机波动特性,目前尚没有理论方法可以描述,主要是通过实测和统计分析进行研究。在研究初级阶段,波动风特性常不被重视,但随着研究深度的发展,人们开始逐渐考虑自然风的波动特性。波动风的特性主要包括波动风速、风向变化、湍流强度、湍流积分尺度、波动功率谱、相关函数等^[9]。

1.2.1 波动风速

波动风速 $V'(t)$ 是指在某时刻 t , 空间某点上的瞬时风速 V' 与平均风速 $\bar{V}$ 的差值。自然风的波动风速的概率密度分布非常接近于高斯分布(正态分布)。大气的湍流运动受大气热力和动力的共同影响,受地貌特征和温度层结的强烈影响,波动风速随高度的减小而增加^[6]。

波动风速的分析方法有多种,庞加斌等^[14]总结了实测湍流波动风速的两种常用分析方法,即矢量法和标量法。由于矢量法考虑了风向的波动,这两种方法对应的湍流波动特性分析结果(如平均风速、阵风因子、湍流度、功率谱密度和湍流积分长度等)存在一定的差别。显而易见,实测风速的波动

越强烈,两种方法之间的差别越大。

在小时间尺度(几小时内)范围内,由于大气的不可压缩流动性和惯性主导了风速的变化周期,在连续的几个小时内会出现周期性的变化,可以将风简化成均匀流和旋流的叠加。而在中尺度范围内,太阳辐射变化导致的受热不均匀性开始主导风的变化,故不能用此方法。基于该简化方法,马志勇等^[15]建立了一种“湍流圆”模型,如图 1 所示,将某段时间内瞬时风速 V' 看作一个切向速度为 V'' 的简单旋流与速度为 V 的均匀气流的合成。定义 β 为 V 和瞬时风速 V' 之间的夹角,风向波动的最大幅度为^[15]

$$\sin\beta_{\max} = \frac{V''}{V} \quad (1)$$

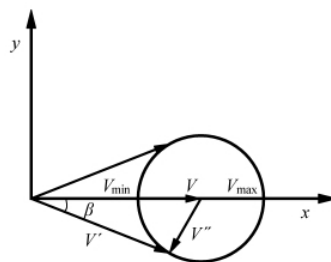


图 1 风波动湍流圆示意

Fig. 1 Turbulence circle of the wind pulsation

1.2.2 湍流强度

大气边界层的 Re 数很大,因此自然风总是处于湍流状态,气流的运动形态极不稳定。湍流强度是描述风速随时间和空间变化的程度,反映波动风速的相对强度,是描述大气湍流运动特性的最重要的特征量。湍流强度 ε 定义为波动风速均方根值与平均风速之比,即^[6]

$$\varepsilon = \frac{\sigma_u}{\bar{V}} \quad (2)$$

其中, σ_u 、 $\bar{V}$ 分别表示为脉动风速均方根值和平均风速。

根据前文提到的马志勇^[15]的“湍流圆”模型,可以推出湍流强度为

$$\varepsilon = \frac{\sin\beta_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{V''}{\sqrt{2} V} \quad (3)$$

一般来说,在大气边界层的地表面,湍流强度与离地高度、地表面粗糙长度等有关,许多文献给出了其相关函数,但这种方法是一种静态的方法,将大气湍流“冻结”在某一时间点上,不能确定反映风速的湍流变化。在自然通风研究中,通常主要考虑的是与平均风速方向平行的纵向湍流强度 ε_u 。

1.2.3 功率谱密度函数

自然风的波动风部分由不同尺度的涡在该点处不同频率的波叠加而成。不同尺度的旋涡具有不同的频率和波数。尽管实际的紊流并不是确定的频率,但从统计平均的角度可将能量在一定范围频率内的分布表示出来,这种方法就是频谱分析。

在 20 世纪 80 年代,日本学者就发现自然风具有 $1/f$ 紊动特性,随后不断有学者证实了这一发现^[16]。2000 年,朱颖秋^[17]对自然风和机械风进行了实测和分析,给出了自然风和机械风功率谱密度分布图,描述了自然界的 3 种信号:白噪声、 $1/f$ 噪声、褐色噪声,它们在功率 G -频率 f 的双对数图上的关系如图 2 所示。

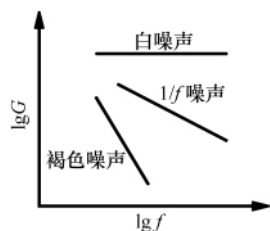


图 2 功率 G -频率 f 双对数图

Fig. 2 Bi-logarithmic diagram of power spectral density function vs frequency

白噪声是完全随机的,不存在自相关性,任意时刻的粒子的速度均毫不相关。褐色噪声有很强的自相关性,在对数功率谱曲线上为负斜率($\beta=2$)的直线, $1/f$ 噪声处于以上二者之间($0<\beta<2$),存在一定的自相关性。对于功率谱指数 β ,如果 $0<\beta<2$ 就符合 $1/f$ 噪声功率谱的要求,如果 $1<\beta<2$ 就符合湍流功率谱的要求^[16]。自然风是属于 $1/f$ 噪声, β 值可以作为自然风和机械风的判定依据,朱颖秋^[17]发现 $1.1<\beta<2$ 为自然风, $\beta<1.1$ 则判为机械风。

现今有很多湍流功率谱用来描述波动风特性。这里主要介绍适用于工程用的纵向湍流功率谱。Davenport 谱^[18]是根据世界不同地点、不同高度实测得到的纵向湍流功率谱平均值建立的,他给出的是离地 10m 高度处的纵向湍流功率谱,并没有反映大气运动中湍流功率谱随高度的变化。此外,该功率谱还假设湍流积分尺度是一个常数值,因此在高频部分过高估计了谱的值;而 Harris 谱^[19]在 Davenport 谱的基础上作了改进,但其仍然没有考虑高度的变化,显然,对于高层构筑物这两种谱并不适用。因此之后出现了考虑随高度的变化的 Kaimal 谱^[20]、Simiu 谱^[21]以及 Kármán 谱^[22];其中,Kármán 谱适用于离地高度 150m 以上的大气湍流和风洞气流中的湍流特性。但由于这些功率谱均是在大气中性结层下建立的,工程上使用还有一定的局限性。

1.2.4 波动风的相关函数

通常假定波动风为各态历经的平稳随机过程,可以用一个样本的时间平均来近似等于总体平均,描述整个波动风的过程,得到波动风的统计特性。而波动风在不同时空上的相关性是风工程研究中的一个重要的统计参数,其相关程度可以分别在时域中用相关函数和在频域中用相干函数来描述。

在时域内,波动风的相关函数可分为自相关函数和相互相关函数。自然通风研究中常用的纵向波动风速的自相关系数随时间滞后的增加而呈指数衰减。自相关性与平均风速大

小、离地高度、地表面粗糙长度和风结构有关,平均风速越大,离地高度越高,自相关性越好,地表面粗糙长度越大,自相关性越差。而互相关性除与上述因素有关外,还受空间两点间距的影响,间距越大,相关性越差^[6]。

在频域内,波动风的相关性一般用相干函数来表示。相干函数是频率和间距的函数,纵向波动风速的竖向相关和横向相关都与平均风速大小、空间两点间距、离地高度、地表面粗糙长度和风结构等有关,空间相关性随着平均风速和离地高度的增加而增加,随着空间两点间距及地表面粗糙长度的增加而减小^[6]。

1.2.5 湍流积分尺度

大气湍流是由许多不同尺度的涡旋运动组成的,不同尺度的涡旋对应有不同的特性,在大气湍流运动中分别起着不同的作用。湍流积分尺度 L_u^* 又称紊流长度尺度,可表示与纵向波动速度有关的涡旋纵向的平均尺度^[6]。

$$L_u^* = \frac{1}{\sigma_u^2} \int_0^{+\infty} R_u(x) dx \quad (4)$$

其中, $R_u(x)$ 为同一时刻 t ,空间两点间的纵向波动速度的空间相关函数; x 为纵向波动速度 u' 的方向; σ_u^2 为纵向波动风速分量的均方值。

湍流积分尺度取决于离地高度和地面粗糙度,它随离地高度而增加,随地面粗糙度增加而减小,湍流积分尺度同样也是反映风场特性的一项重要指标。

1.2.6 分形及混沌特性分析

混沌是一种由确定性非线性系统中不需要附加任何随机因素产生的一种貌似无规则又类似随机的伪随机行为。自然风受到大气运动的作用而处于湍流状态,湍流作为一种有着一定自相关性的随机过程,与混沌有着密切的联系。因此可以运用混沌的方法研究湍流现象^[23]。

分形与混沌是密不可分的,它是指看似混沌杂乱无章但具有精细结构的图形,这种结构主要表现为一种内在的几何规律性,即比例自相似性,称为自相似结构。它用于研究混沌的主要方法就是相空间重构。不同的系统产生的相图一般形状不同。研究者们^[23]发现自然风的二维相空间重构图呈纺锤形,说明自然风速具有一定的相关性,而不是完全随机的。其特征参数取纺锤形的宽长比 $\delta=B/L$,如图 3 所示。自然风的 δ 小于机械风,因此同样可将 δ 作为自然风和机械风的另一个

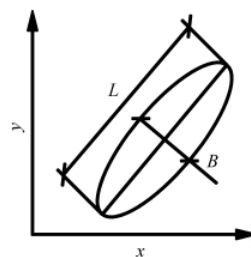


图 3 相空间重构图

Fig. 3 Phase space reconstruction



重要判定依据^[24]。2000年,朱颖秋^[17]提出, $\delta < 0.25$ 时,为自然风; $\delta > 0.25$ 时为机械风。

2 波动特性对室内环境的影响

室内环境是现代人们重要的生活和工作环境之一,而自然风是一种绿色经济的改善室内环境的手段。由于自然风特性的复杂性,过去常将其简化为平均风来进行研究,但随着逐步深入的探讨发现波动特性在很多自然通风问题中是不容忽略的。如对于开口平行于风向的建筑,它主要是由波动风部分驱动,平均风部分的影响几乎接近于零;对于单侧开口建筑,影响其通风量主要考虑的因素是气流的湍流强度、湍流积分尺度以及阵风引起的压力波动。此外,各国的研究者发现,人们对室外的自然风有着更好的接受性。因此,自然风的波动特性对室内环境的影响同样是值得重视的。

2.1 非稳态边界条件下自然通风量的计算

非稳态边界条件下自然通风量的计算方法大致可以归纳为两类,第一类为基于稳态条件下的参数修正方法,包括流量系数和风压系数的修正。传统的风压作用下,通风量的研究方法主要是伯努利方程^[25]:

$$Q=C_z A \sqrt{\frac{2|\Delta P|}{\rho}}$$
 (5)

其中, Q 为自然通风量, C_z 为流量系数, A 为开口面积, ΔP 为开口两侧的压力差, ρ 为空气密度。前人研究的流量系数都是在稳态风场的状态下所确定的,若用于非稳态风场中的自然通风系统较容易产生误差。Heiselberg等^[26]认为若考虑非稳态特性,流量系数不能被看作是常数,它是雷诺数、风向、流向的函数^[25]。

式(5)中,压差的表达式为^[27]

$$\Delta P=\frac{1}{2}C_{p1}\rho v_0^2-\frac{1}{2}C_{p2}\rho v_0^2$$
 (6)

其中, v_0 为空气流过开口的流速, C_{p1} 、 C_{p2} 为前后墙体风压系数,是一种无量纲参数,是风力在建筑表面产生的压力与参

考风速下所对应的动压的比值。传统的稳态条件下的自然通风采用的是平均风压系数,前面提到的李志强对正弦型波动来流条件下建筑物表面压力系数相对定长来流有较明显的改变。另外,许多研究证实若采用平均值,不能反映建筑表面风压的实际分布,且有较大偏差。由于风对建筑物作用的绕流流场极为复杂,相互间的气动干扰难以预测,风压系数难以从理论计算上直接获得,一般通过实测、风洞实验和数值模拟等方法进行研究^[28]。

第二类为针对波动特性直接提出的非稳态计算模型。在对风压驱动下的自然通风的机理进行了研究后,研究者^[29]将其分为3部分:稳态流、波动流及漩涡渗透流。前者由自然风的平均特性引起,后者由波动特性引起。稳态流是由于绕建筑压力场在穿过开口的压力变化引起的,通风量的计算比较简单,可由简单的区域模型方法得到,并由能量和连续方程描述。波动流是相对较大尺度的空气进出开口,是由于室内空气的压缩性而引起波动气流,使得开口处压力产生变化。这种通风量的常用计算方法是推导出每个开口的动量方程,并考虑压缩性以及惯性作用,因此不需要用到流量系数。漩涡渗透流是由小于或者等于开口尺度的小尺度的涡流湍流引起的,与空气的压缩作用基本无关。漩涡渗透流是迄今为止人们了解最少的,通风量的预测方法还不完善。

自然通风量的预测很复杂,受到多重因素的影响和制约,其影响因素主要归纳为两大类,另一类是自然风的风特性,主要包括风速、风向、湍流强度等因素;一类是建筑物自身的特点,即建筑物的几何外形,门窗开口的类型、大小、位置等因素^[30]。在国内虽然也有对自然通风的模型进行研究,但均未考虑自然风波动特性的影响^[31]。国外建立了一系列的非稳态风压下自然通风模型,见表1。

另外,利用CFD技术也可以用来模拟计算非稳态条件下的自然通风。湍流数值模拟方法大体可分为直接数值模拟(DNS)、大涡模拟(LES)以及雷诺平均法(RANS)3种。DNS方

表 1 基于非稳态风压的自然通风模型
Table 1 Natural ventilation model based on fluctuating wind

模型	主要特点	作者
脉动模型	由自然风纵向波动和空气的可压缩性而引起单开口波动流	Cockroft,Robertson ^[32]
机械系统仿真模型	借用机械系统来模拟缝隙的阻力、缝隙的深度、建筑的容积和室外风压共同对渗透气流的影响	Sasaki等 ^[33]
相关模型	提出了一个经验表达式来表示通过开启窗户的通风量,该表达式是一个与温差,风速和湍流特性相关的函数	Pha,De Gidds ^[34]
	假定波动气流与风压的均方值成比例,系数与开口特性和经验常数有关	Etheridge,Alexander ^[35]
	对一个单开口建筑通过示踪气体法进行测量,得到一些经验关系式	Crommelin,Vrins ^[36]
数值模拟模型	对基本的控制方程进行数值求解	Kazic,Novak ^[37]
共振模型	内部波动压力是由二阶非线性微分方程数值求解	Holmes ^[38]
能量频谱分析模型	能量频谱分析模型可用于单开口和双开口建筑的湍动风压引起的波动气流	Haghighat等 ^[39]

法从流体控制方程出发求解湍流问题,可以求解不同尺度涡的运动,理论上可以得到相对准确的计算结果,但由于其对计算机内存空间及运算速度的要求非常高,目前还不能很好地运用于自然通风的模拟计算中。RANS方法的核心是将瞬态的脉动量通过某种模型在时均化的方程中体现出来,它对自然风的平均风特性的分析具有较好的精度,若考虑波动风的影响,RANS方法的缺陷显而易见。LES是介于DNS和RANS之间的数值方法,它将湍流分解为大尺度脉动和小尺度脉动,利用瞬时的Navier-Stokes方法直接求解湍流中的大尺度涡,而对小尺度涡,则采用建立亚格子模型来予以反映^[40]。国内外的学者^[11,41]用LES方法模拟了湍动来流下的穿堂风,结果表明与实验结果能够很好地吻合。

2.2 对舒适性的影响

相比正弦风、机械风、随机动态风而言,人们对自然风在舒适性和可接受性方面的综合评价均优于其他形式的气流。由于自然风具有的独特的波动特性,自然风能很好地改善人体的热舒适性^[42-43]。目前,自然风的波动特性对热舒适性影响的研究主要集中在湍流强度和波动频率^[24],也有少部分学者提到了功率谱密度函数的影响^[44]。

自然风的气流湍流强度对人体热舒适的影响的研究方式主要有两种,即从主观和客观角度进行分析。

从主观角度出发,主要是通过投票来评价热舒适性^[45-46],着重强调心理和生理上的感受。通常在稳态条件下,热舒适模型是采用Fanger提出的PMV(Predicted Mean Vote)模型,然而由于自然风具有的波动特性,导致PMV值与实际的投票结果存在较大偏差,于是该研究领域进一步提出了PMV修正模型和适应模型^[47],修正模型中用不同环境下的心理期望因子加以修正,但是却过于强调了这一因素的影响;而适应性模型则以室外温度作为室内热舒适的唯一判定依据,它完全没有考虑影响人体生理热平衡的环境参数,Fanger^[48]认为这并不能反映其实际机理。由于这两种模型均存在的缺陷,清华大学欧阳沁^[47]基于这两个模型,提出应建立除考虑环境因素和人为因素外,还应考虑湍动特性参数、人的心理期望、人的精神紧张程度等包括在内的集总参数模型。

从客观角度出发,主要研究对流换热与自然风湍流强度的关系,Mayer^[49]用暖体假人研究了自然风湍流强度对假人表面的对流换热的影响,湍流强度是可以用来表征流体微团的混合强度,湍流强度越大,动量与热量的传递也越大,人体皮肤对流换热系数越大,从而导致换热量加大。

波动频率也是影响热舒适的一个重要参数,由于小尺度的高频涡旋气流强烈的粘性耗散作用,使得能量急剧减小,研究发现自然风在低频处的功率谱密度要远大于高频处,紊流能量90%以上都贮存在尺度较大的低频涡旋,故低频风是影响人体热舒适的主要研究对象。人们对自然风的可接受的频率范围主要集中在0.2—0.65Hz的低频处^[50]。如果频率超过1Hz,人体对风速的波动并不敏感,感受不到频率的变化。如

果频率低于0.244mHz时,则会造成风速不稳而时大时小的不舒适感^[51]。

根据学者们的研究,笔者总结出对人体产生舒适性的自然风满足以下几个条件:风速波动频率在0.4Hz左右,风速频谱曲线接近自然风,谱特征值 β 在1.5左右,且需符合 $1/f$ 特性,湍流强度较高(一般大于0.5),室内气流的大涡长度尺度 L 值与室内实际房间尺度接近。这些特性值为研制模拟自然风的空调装置提供了很好的基础数据,对改善室内热环境具有重要的实用价值。

3 结论与展望

本文对自然风的非稳态特性及其波动特性对室内环境影响进行了研究综述,得出了以下结论。

(1) 自然风是一种随机的湍流运动,虽然人们对其做了大量的研究,但还没有学者系统的对其自然风特性进行总结分析,本文总结概述了自然风的平均风特性和波动风特性,为建立精确的自然风模型提供依据。

(2) 非稳态边界条件下自然通风量计算可归纳为2类,一种是基于稳态条件下的修正方法,主要是流量系数和风压系数的修正;一种是基于波动特性提出的非稳态模型。国外同行对非稳态边界条件下的自然通风量的计算进行了大量研究,并建立了大量的自然通风气流模型,而国内还没有人提出非稳态计算模型。因此在未来的研究中应结合国外研究,尽快建立并完善适合中国自然通风工程设计用的模型体系。

(3) 自然风的非稳态特性对人体舒适性的研究目前主要集中在湍流强度和波动频率上,湍流强度对人体舒适性的研究绝大部分是从反映生理和心理角度出发的主观投票来评价,从物理角度出发的对流换热的机理研究却相对较少。

参考文献 (References)

- [1] Chiu Y H, Etheridge D W. External flow effects on the discharge coefficients of two types of ventilation opening [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2007, 95(4): 225-252.
- [2] 柯其枝, 谭洪卫, 朱伟民, 等. 风特性对焊接厂房自然通风效果影响的探讨[J]. *建筑热能通风空调*, 2007, 26(1): 97-99.
Ke Qizhi, Tan Hongwei, Zhu Weiming, et al. *Building Energy & Environment*, 2007, 26(1): 97-99.
- [3] 王亮, 谭洪卫, 季亮. 外场风速和建筑空间条件对自然通风的影响[J]. *建筑热能通风空调*, 2009, 28(1): 50-53.
Wang Liang, Tang Hongwei, Ji Liang. *Building Energy & Environment*, 2009, 28(1): 50-53.
- [4] 李志强, 王元, 张鸿雁. 正弦波动来流条件下复杂结构建筑表面风压分布[J]. *西安建筑科技大学学报: 自然科学版*, 2009, 41(2): 246-251.
Li Zhiqiang, Wang Yuan, Zhang Hongyan. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition*, 2009, 41 (2): 246-251.
- [5] Straw M P, Baker C J, Robertson A P. Experimental measurements and computations of the wind-induced ventilation of a cubic structure [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2000, 88(2-

- 3): 213-230.
- [6] 贺德馨. 风工程与工业空气动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
He Dexin. Wind engineering and industrial aerodynamics [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2006.
- [7] 成镭. 重庆某临江住宅自然通风模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
Cheng Lei. The simulation research on a river-side residential building [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [8] 赵林, 李念平. 住宅建筑中庭内自然通风的数值模拟 [J]. 科技导报, 2009, 27(2): 73-77.
Zhao Lin, Li Nianping. Science and Technology Review, 2009, 27(2): 73-77.
- [9] 杨建坤, 张旭, 刘东, 等. 自然通风作用下中庭建筑热环境的数值模拟 [J]. 暖通空调, 2005, 35(5): 26-29.
Yang Jiankun, Zhang Xu, Liu Dong, et al. Journal Heating Ventilation and Air conditioning, 2005, 35(5): 26-29.
- [10] 张伯寅, 桑建国, 吴国昌. 建筑群环境风场的特性及模拟—风环境模拟研究之一[J]. 力学与实践, 2004, 26(3): 1-9.
Zhang Boyan, San Jianguo, Wu Guochang. Mechanics in Engineering, 2004, 26(3): 1-9.
- [11] Hu C H, Ohba M, Yoshie R. CFD modelling of unsteady cross ventilation flows using LES [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(10-11): 1692-1706.
- [12] Kurabuchi T, Akamine Y, Ohba M, et al. A study on the effects of porosity on discharge coefficient in cross-ventilated buildings based on wind tunnel experiments [J]. The International Journal of Ventilation, 2006, 5(1): 67-78.
- [13] Mochida A, Yoshino H, Takeda T, et al. Methods for controlling airflow in and around a building under cross-ventilation to improve thermal comfort [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2005, 93(6): 437-449.
- [14] 庞加斌, 宋丽莉, 林志兴, 等. 风的湍流特性两种分析方法的比较及其应用[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(1): 27-32.
Pang Jiabin, Song Lili, Lin Zhixing, et al. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2006, 34(1): 27-32.
- [15] 马志勇, 芮晓明, 康传明. 风特性的一种工程建模方法 [J]. 中国电力, 2007, 40(4): 82-85.
Ma Zhiyong, Rui Xiaoming, Kang Chuangming. Electric Power, 2007, 40(4): 82-85.
- [16] 欧阳沁, 朱颖心. 自然风的 1/f 紊动特性的研究现状与展望 [C]//全国暖通空调制冷 2002 年学术年会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 292-295.
Ouyang Qin, Zhu Yingxin. The current study and prospect of the 1/f fluctuation characteristics of natural wind [C]//Proceedings of National Annual Conference on HVAC & R. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002: 292-295.
- [17] 朱颖秋. 自然风与机械风的紊动特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2000.
Zhu Yingqiu. Research on the fluctuant characteristics of natural wind and mechanical wind[D]. Beijing: Tsinghua University, 2000.
- [18] Davenport A G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1961, 87(372): 194-211.
- [19] Harris R I. The nature of wind in the modern design of wind sensitive structures [R]. London: Construction Industry Research and Information Association, 1971.
- [20] Kaimal J C. Spectral characteristics of surface -layer turbulence [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1972, 98(417): 563-589.
- [21] Simiu E, Scanlan R H. Wind effects on structures an introduction to wind engineering[M]. 2nd ed. New York: Wiley-Interscience, 1986.
- [22] Von Kármán T. Progress in the statistical theory of turbulence [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1948, 34(11): 530-539.
- [23] 陈军. 模拟自然风的研究及其热舒适性评价 [D]. 上海: 东华大学, 2010.
Chen Jun. Study on simulation natural wind and its thermal comfort evaluation[D]. Shanghai: Donghua University, 2010.
- [24] 朱颖心, 欧阳沁, 戴威. 建筑环境气流紊动特性研究综述 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(12): 1622-1625.
Zhu Yingxin, Ouyang Qin, Dai Wei. Journal of Tsinghua University: Natural Science Edition, 2004, 44(12): 1622-1625.
- [25] Chu C R, Chiu Y H, Chen Y J, et al. Turbulence effects on the discharge coefficient and mean flow rate of wind-driven cross-ventilation [J]. Building and Environment, 2009, 44(10): 2064-2072.
- [26] Heiselberg P, Sandberg M. Evaluation of discharge coefficients for window openings in wind driven natural ventilation[J]. The International Journal of Ventilation, 2006, 5(1): 43-52.
- [27] 李红祥. 风压作用下自然通风阻力特性研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2004.
Li Hongxiang. The research on resistance property of natural ventilation induced by wind force [D]. Changsha: Hunan University, 2004.
- [28] 王琨玲, 高甫生. 渗风计算中的风压系数影响因素分析[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, 34(4): 829-832.
Wang Yanling, Gao Fusheng. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2001, 34(4): 829-832.
- [29] Chaplin G C, Randall J R, Baker C J. The turbulent ventilation of a single opening enclosure[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 85(2): 145-161.
- [30] Larsen T S, Heiselberg P. Single-sided natural ventilation driven by wind pressure and temperature difference [J]. Energy and Buildings, 2008, 40(6): 1031-1040.
- [31] 高甫生. 国内外空气渗透讨论方法研究现状及分析 [J]. 通风除尘, 1991, 10(2): 30-34.
Gao Fusheng. Building Energy & Environment, 1991, 10(2): 30-34.
- [32] Cockroft J P, Robertson P. Ventilation of an enclosure through a single opening [J]. Building and Environment, 1976, 11(1): 29-35.
- [33] Sasaki T, Hayashi M, Aratani N. On the ventilating characteristics of the space under the fluctuating wind pressure [C]//Proceedings of Room vent-87, Air Distribution in Ventilated Spaces, Session 4a, Stockholm: Tekniska Hogsk Press, 1987.
- [34] Phaff H, De Gids W. Building ventilation, investigation of the consequence of opening one window on the internal climate of a room [R]. Report C448, Delft, Netherlands: TNO Institute for Environmental Hygiene and Health Technology (IMG-TNO), 1980.
- [35] Etheridge D W, Alexander D K. The British Gas multi-cell model for calculating ventilation[J]. ASHRAE Trans, 1980, 86(2): 808-821.
- [36] Crommelin R D, Vriens EMH. Ventilation through a single opening in a scale model[J]. Air Infiltration Review, 1988, 9(3): 11-15.
- [37] Kazic N, Novak P. A dynamic model of air movement in a building[C]// Proceedings of CLIMA 2000, The Second World Congress on Heating, Ventilating, Refrigerating and Air Conditioning, Sarajevo, Yugoslavia, Yugoslav Committee of Heating, Refrigerating and Air Conditioning, 1989, 1: 250-255.

- [38] Holmes J D. Mean and fluctuating internal pressure induced by wind [C]/Cermak J E. Wind Engineering, Proceedings of the Fifth International Conference, Fort Collins, Colorado: Pergamon Press, 1980, 1:50-435.
- [39] Haghighat F, Rao J, Fazio P. The influence of turbulent wind on air change rates—a modelling approach [J]. *Building and Environment*, 1991, 26(2): 95-109.
- [40] 王福军. 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 116-119.
Wang Fjun. Analysis of hydrokinetics: Theory and application of software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 116-119.
- [41] Jiang Y, Chen Q. Effect of fluctuating wind direction on cross natural ventilation in buildings from large eddy simulation [J]. *Building and Environment*, 2002, 37(4): 379-386.
- [42] 朱颖心, 欧阳沁, 李宏军, 等. 建筑环境中气流动态特征研究[C]/制冷空调新技术进展—第四届全国制冷空调新技术研讨会论文集, 南京: 《化工学报》编辑部, 2006.
Zhu Yingxin, Ou Yangqin, Li Hongjun, et al. Fluctuation characteristics of airflow in built environment [C]/New Technological Advances for Refrigeration and Air Conditioning—Proceedings of the 4th National Conference on New Technology, Nanjing: Editorial Department of *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2006.
- [43] 朱守林, 戚春华, 李文彬. 自然风气流对人体热舒适影响的实验研究[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(4): 54-58.
Zhu Shoulin, Qi Chunhua, Li Wenbin. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(4): 54-58.
- [44] 巨永平. 房间气流紊动特性的研究[D]. 天津: 天津大学, 1996.
Ju Yongping. Research on the turbulent characteristics of room airflow [D]. Tianjin: Tianjing University, 1996.
- [45] Fanger P O, Melikow A K, Hanzawa H, et al. Air turbulence and sensation of draught[J]. *Energy and Building*, 1988, 12(1): 21-39.
- [46] Barbara G, Christa K, Ulrike G. The significance of air velocity and turbulence intensity for response to horizontal rafts in a constant air temperature of 23°C[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2000, 26(6): 639-649.
- [47] 欧阳沁, 戴威, 周翔, 等. 自然通风环境下的热舒适分析[J]. 暖通空调, 2005, 35(8): 16-19.
Ouyang Qin, Dai Wei, Zhou Xiang, et al. *Journal Heating Ventilation and Air conditioning*, 2005, 35(8): 16-19.
- [48] Fanger P O, Toftum J. Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates [J]. *Energy and Buildings*, 2002, 34(6): 533-536.
- [49] Mayer E. Influence of air turbulence on the convective surface heat transfer coefficient[C]/Proc. 3rd International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Stockholm: Swedish Council for Building Research, 1984, 5: 377-382.
- [50] 夏一哉, 赵荣义, 牛建磊. 等温热环境中紊动气流对人体热感觉的影响[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2000, 40(10): 100-103.
Xia Yizai, Zhao Rongyi, Niu Jianlei. *Journal of Tsinghua University: Natural Science Edition*, 2000, 40(10): 100-103.
- [51] 贾庆贤, 赵荣义. 风速频谱对人体热舒适性的影响[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2001, 41(6): 89-91.
Jia Qingxian, Zhao Rongyi. *Journal of Tsinghua University: Natural Science Edition*, 2001, 41(6): 89-91. (责任编辑 代丽)

· 学术动态 ·

“第九届海峡两岸沙尘与环境治理 学术研讨会”征文

由内蒙古科学技术协会、台湾蒙藏基金会主办, 2012 年 7 月 23 日在上海市召开“第九届海峡两岸沙尘与环境治理学术研讨会”。

征文范围: (1) 沙尘暴的监测与预报; (2) 沙尘暴与土地利用和土地覆盖; (3) 荒漠化草原的恢复理论与技术; (4) 沙尘暴与人类健康; (5) 沙尘暴与生态; (6) 沙尘气溶胶对气候环境的影响; (7) 沙尘暴防御与环境治理对策; (8) 公民参与环境检测与新技术应用; (9) 沙尘源区的荒漠化防治; (10) 干旱区退化生态系统修复技术。

论文截稿日期: 2012 年 5 月 31 日。

联系电话: 0471-6289923。

电子信箱: fao@imu.edu.cn。

通信地址: 呼和浩特市大学西路 235 号 内蒙古大学国际合作与交流处。

会议网站: <http://www.sbxh.org/page/xhhd/zywyh/2012/0508/3652.html>。